

文章编号:1001-9081(2005)09-2104-04

无线自组网节能 MAC 协议综论

黎 宁^{1,2}, 王志明²

(1. 中国电子科技集团公司 第七研究所, 广东 广州 510310;

2. 中国人民解放军 第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

(liningbjqh@sina.com)

摘 要:首先介绍了在无线自组网中引入节能 MAC 协议的背景, 讨论了进行节能 MAC 协议设计的相关问题, 包括无线网络接口设备的功耗特点、影响能耗效率的表现形式、设计协议时所需遵循的原则以及可采用的节能手段。对当前典型的节能 MAC 协议和有助于提高能耗效率的 MAC 层措施进行了举例介绍和分析。最后, 对节能 MAC 协议研究的发展趋势和面临的挑战作了展望和论述。

关键词:无线自组网; 媒体接入控制 (MAC); 节能 MAC 协议

中图分类号: TN 925.93 **文献标识码:** A

Survey of energy-efficient MAC protocols for Ad hoc networks

LI Ning^{1,2}, WANG Zhi-ming²

(1. No. 7 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Guangzhou Guangdong 510310, China;

2. Ordnance Equipment Research Institute of the 2nd Artillery, P. L. A, Beijing 100085, China)

Abstract: Firstly, the background of using energy-efficient MAC protocols for wireless Ad hoc networks was introduced. Some related issues were discussed, including power-consumption features of wireless network interface devices, several factors that would influence the energy-efficiency, critical principles that must be kept when designing energy-efficient MAC protocols and usual approaches that can be resort to. Then, several typical energy-efficient MAC protocols and techniques were reviewed. Finally, some future research directions and challenges that must be overcome on this topic were investigated.

Key words: wireless Ad hoc networks; medium access control (MAC); energy-efficient MAC protocols

随着无线网络接口设备(简称无线接口设备)体积缩小、价格下降,各种新的无线自组网(如:无线局域网、传感器网等)和新型应用将越来越普及。在无线设备的电力供应问题仍未较好解决的情况下,节能问题已成为影响无线网络未来发展的一个关键因素,并受到业界的高度关注。本文主要就如何在链路层的媒体接入控制(Medium Access Control, MAC)子层进行节能协议设计及其相关问题展开讨论。

1 节能 MAC 协议的研究背景

无线自组网中,移动节点的无线接口设备由于使用环境的特殊性,在许多时候只能由电池供电。现实情况是:当前电池性能并不能完全满足普通用户的期望;而受限于材料科学的发展,相同重量电池所能携带的电量很难在短时间内有突破性提高;随着各种无线设备性能的提升和功能的加强,其对电能的需求仍然在不断提高。有鉴于此,采用节能技术是解决这一矛盾的现实方法。

通常,节能问题可以从硬件制造技术上来解决,而且关于降低硬件能耗的问题通过多年努力已在许多方面取得长足进步。另一方面,在协议栈各层进行节能设计则是一个较新的研究热点。节能协议的设计可以在协议栈各个层次进行,从物理层到应用层都可以以节能为目的而设计出新协议。

MAC 协议的主要功能是用来完成节点对信道的访问。由于无线信道的共享特性,使得网络中的节点在接入信道时必须公平和高效,这对 MAC 协议提出了较高要求。如果在 MAC 协议中引入节能机制,则有可能使协议性能受到一定影响。因此,节能 MAC 协议研究的主要目的就是要针对不同的

具体环境和使用要求设计出新的节能协议,并在节能性能和其他性能之间进行折中,以达到整体性能的最优化。

2 节能 MAC 协议的相关问题

2.1 无线接口的功耗特点

在进行节能 MAC 协议设计时,主要考虑如何降低无线接口设备的能耗。

无线接口设备一般可工作于三种模式之一:发送模式、接收模式和空闲模式(功耗依次减小)。通常,为达到节能目的而设计的新产品还可以增加一个功耗极低的睡眠模式。根据无线接口设计原理的不同,工作于各模式时的功耗比值可能有巨大差别。如某些使用嵌入式收发机的小型计算/通信设备或大型电台发射时的功耗可比接收功耗高 1 个数量级以上。而普通笔记本电脑无线网卡的发送模式功耗只有空闲模式功耗的 2 倍左右。另外,无线接口睡眠模式功耗远远低于其他各工作模式的功耗。我们可以依据无线接口设备功耗特性及应用环境、使用方式等因素进行有针对性的节能协议设计。

2.2 影响能耗效率的表现形式

若定义能耗效率为:相同规模的网络中,单位能量所能成功传输的业务负载,则我们可以用能耗效率来衡量 MAC 协议的节能性能。

影响能耗效率的因素主要包括:发送报文时使用了过高的发射功率,造成能量的不必要浪费;接收了与自己无关的报文;没有通信事件发生时,无线接口未进入睡眠模式;MAC 协议运行时碰撞过多;MAC 协议的开销过大;因 MAC 协议不能很好适应无线信道的时变特性而导致传输效率降低。

收稿日期:2005-01-05;修订日期:2005-04-11

作者简介:黎宁(1973-),男,湖北宜昌人,博士,主要研究方向:宽带网络技术、无线通信;王志明(1973-),男,山东庆云人,工程师,主要研究方向:无线通信、卫星通信。

2.3 设计节能 MAC 协议所需遵循的原则

- 1) 以提高协议的能耗效率、延长网络/节点工作时间为目的。
- 2) 优化 MAC 协议的综合性能。不能片面追求节能性能,而忽视对协议其他性能的影响,需要在吞吐率、时延、公平性、能耗效率等各种因素之间进行折中。
- 3) MAC 协议综合性能最优(局部最优)并不一定意味着全局最优。必须从协议栈全局出发,考虑各层协议之间的协作,为最终用户提供最佳协议支持。
- 4) 不同的自组网在应用环境、使用方式、无线接口功耗特性等各方面千差万别,必须根据具体情况进行有针对性的协议设计。

2.4 节能手段

可采取以下几种主要手段进行节能 MAC 协议设计,如:发送报文时采用功率控制机制;动态关闭无线接口机制;采取针对性措施以增强协议有效性,减少协议开销,提高能耗效率。

3 节能 MAC 协议介绍

3.1 功率控制协议

功率控制机制通过调整发送节点的信号发射功率,在保证一定通信质量的前提下尽量降低信号发射功率。在一些发射代价较大的系统中采用功率控制可大幅降低无线接口射频功耗,节能效果非常明显。在某些功率控制协议中,在节能的同时还可提高系统吞吐率。功率控制可在 MAC 层进行也可在网络层进行,本文主要讨论 MAC 层的功率控制,它通常不会引起网络拓扑结构的改变。

无线自组网中普遍采用的 CSMA/CA 类型的 MAC 协议(一个常见的例子是 IEEE 802.11 标准中定义的分布式协调功能 DCF^[1])。在发送数据报文前要首先经过 RTS/CTS 控制报文的交互,这为进行功率控制提供了极大方便。

控制报文通常可用最大功率发送,我们可在其中添加一些字段以便为发送数据及 ACK 时进行功率控制提供帮助。发射功率应该在功耗和报文正确接收概率之间进行折中,还应考虑功率控制对网络总吞吐率的影响。控制报文也可以用较小功率发送,但应解决好由此而产生的不公平性问题。

Muqattash^[2]提出的 PCDC 双信道协议中,RTS、CTS 在控制信道上用最大功率发送,数据在数据信道上用较小功率发送。节点发送 RTS、CTS 报文后在数据信道通信期间,并不阻止其他节点在控制信道发送 RTS、CTS 报文。只要新的通信不影响已有的报文传输,则多对邻近节点可以同时数据信道进行通信。PCDC 为了降低能耗,对路由层 RREQ 广播报文也进行功率控制,并使有利于降低能耗的下一跳节点能成功接收,以此维护拓扑结构。PCDC 的 ACK 确认在控制信道的一个子信道上传送,ACK 传输信道与数据信道分离可提高系统吞吐率和能耗效率。

802.11 的 NAV(Network Allocation Vector)机制中,只有正确接收到 RTS、CTS 报文的无关节点才会在整个通信期间保持静默状态,而距离稍远一些的节点在发送自己的报文时只能通过载波监听机制来判断当前能否发送。在通常的功率控制协议中,由于数据和 ACK 报文都用较小功率发送,这就缩小了载波监听机制的作用距离,可能使某些节点因为监听不到信道上有载波而发送自己的报文并干扰当前的通信,引起冲突、降低能耗效率。PCM^[3]协议中,节点发送数据报文时大部分时间都用能保证正确接收的较小功率发送,而周期性地将发送功率短暂调至最大值(持续十几微秒,以保证其他节点能够监测到有载波存在),之后再降低至较小功率。PCM

利用了 802.11 中的 EIFS(Extended InterFrame Space)机制(节点如果监测到载波而没有正确接收到报文时,需延时 EIFS 时间后再开始竞争信道),可大幅提高系统吞吐率和能耗效率。

在 POWMAC^[4]协议中,在多对节点同时开始发送数据之前允许它们首先交互 RTS/CTS 报文(交互 RTS/CTS 报文后并不立即开始数据报文的发送)。RTS 用最大功率发送,CTS 的发送功率可根据需要调整,只需能被通信对端及所有潜在的干扰节点接收到即可。协议在 CTS 中加入了一些字段,以限制邻近节点发送报文时所允许的发送功率上限。发送节点发送数据时所用的功率由接收节点根据网络流量状况决定,并通过 CTS 通知发送节点。发送节点收到 CTS 后,还需用最大功率发送一个 DTS(Decide To Send),以通知邻近节点发送将如期进行,以及发送时将要使用的功率。邻近节点将用此信息来判断自己可否在此节点发送数据的同时接收另一节点向自己发送数据。一段时间后(称为接入窗口),成功交互过 RTS/CTS 的多对节点的发送端可同时开始发送数据报文。接入窗口的大小可根据流量状况动态调整,以限制在接收节点附近能同时进行的发送数目。接收节点成功接收数据后,使用较小功率返回 ACK 确认。POWMAC 也能大幅提高系统吞吐率和能耗效率。

3.2 动态关闭无线接口协议

表 1 两种接口设备各模式下的功耗(mW)

接口设备	发送	接收	空闲	睡眠
WaveLAN	1 327	967	844	66
Mica2 Mote	81	30	30	0.003

动态关闭无线接口协议根据监听到的网络状况或事先约定的规则,通过使无线接口设备进入睡眠模式(此时称节点进入睡眠状态)来降低能耗,适用于无线接口设备发射功率相对不高而空闲、接收功耗相对较高的场合。此类设备的例子有:笔记本电脑上使用的无线网卡以及某些传感器的无线接口设备,表 1 列出了 WaveLAN 无线网卡和 Mica2 Mote 传感器的无线接口设备各工作模式下的功耗。如果这类节点在网络中接收的无关报文过多或当没有通信事件发生时无线接口仍工作于空闲模式将会浪费大量能量。

无线接口的关闭操作可由报文驱动,也可由时间驱动或者由时间-报文混合驱动。

在报文驱动的节能协议中,节点通过监听信道上发送的报文,如果当前报文与自己无关,并且即将要在信道上发送的数据足够长,则无关节点可进入睡眠状态以节省能量。无关节点可通过报文报头中包含的长度信息及信道带宽等网络参数来估算发送当前报文所需时间,直到此次通信结束时再唤醒。这类节能协议不需要全网同步,在网络负荷较大时节能效果较好。

在时间驱动节能协议中,如果当前没有报文要收发则节点会在大部分时间内处于睡眠状态,只在某些特定时刻唤醒一小段时间来交互或监听信息。那些当前有报文要发送或接收的节点将在随后的一段时间内处于活跃状态。按照是否需要全网同步,又可分为同步时间驱动节能协议和异步时间驱动节能协议。

同步时间驱动节能协议通过使网络中所有节点在某些特定时间段内同时处于活跃状态并交互信息来保证节能机制的正常运行。全网同步为节点何时从睡眠状态唤醒,何时从活跃状态进入睡眠状态提供时钟参考。

802.11 为单跳无线自组网定义了一种节能模式。节点

将时间轴分为若干连续的 beacon 周期,当 beacon 周期开始时,通过采用特定的同步机制,所有节点都同时唤醒一段时间,称之为 ATIM 窗口(Ad hoc Traffic Indication Message)。有报文要发送的节点会向接收节点发送 ATIM 报文,接收节点通过 ATIM-ACK 报文应答。ATIM 窗口结束之后,那些交互过 ATIM 报文的节点在本 beacon 周期中会一直处于活跃状态,而其他节点则可进入睡眠状态,直到下一 beacon 周期开始时重新唤醒。

基于 802.11 节能模式目前已提出了多种改进措施,如:节点可根据需要动态调整 ATIM 窗口大小;如果在通信过程中已将 ATIM 窗口中通告的流量发送完毕,则可进入睡眠状态。Miller^[5] 为了提高节能性能,还采取了两种新措施:①在 beacon 周期刚开始的一小段时间内(数十微秒,只需让其他节点在这段时间内能够检测到载波即可),所有有报文等待发送的节点都可以同时发送一个(哑)报文,目的是通知其他节点自己有报文等待发送。节点如果在这一小段时间内没有检测到载波,则在本 beacon 周期的剩余时间内可以一直睡眠,而不必在 ATIM 窗口内唤醒。当流量较少时此机制可节省大量能量。②某对节点通过交互 ATIM 报文并开始通信后,则可以自行协商下一次通信的开始时间而无需再次交互 ATIM 报文。这样可以大大减少 ATIM 窗口中发送的 ATIM/ATIM-ACK 数目,也可以大大降低其他节点在 ATIM 窗口中因监听 ATIM 报文而唤醒的时间和耗费的能量。在 NPSM^[6] 协议中,收发双方不必事先交互 ATIM 报文就可以直接通信,通过在控制报文和数据报文中携带特定信息来告知对方及其他节点自己当前有多少报文等待发送、要发给谁以及其他邻居节点总共有多少报文等待发送给自己。当前活跃窗口结束后,节点根据是否还有数据报文正在等待发送给自己以及自己是否有数据等待发送来决定是否可以睡眠。若决定继续处于活跃状态,则在一小段时间后根据相同的规则再次作出判断。

S-MAC^[7] 是用于传感器网络的 MAC 协议,节点周期性地进入睡眠状态,并且在发现其他节点通信时也进入睡眠状态,这是一种时间-报文混合驱动的节能协议。节点睡眠时可被某些特定事件触发后唤醒,短暂通信后又进入睡眠状态。对 S-MAC 的一种改进方法是节点可根据邻居节点的通信情况调节自己在每个周期中的唤醒时长。目前已提出了许多针对传感器网络的节能 MAC 协议,Langendoen^[8] 对此作了全面系统的比较和分析,这里不再赘述。

要在多跳网络中实现全网同步通常相当困难,这促使人们研究异步节能机制。比如:各节点都保持自己的时钟,通过保证任意两个节点在一定的周期内总有一段时间同时处于活跃状态来保证节点间的正常通信。另一种方法是使用一个经专门设计的低功耗的辅助收发机来控制主收发机何时从睡眠状态中唤醒。如在 PicoRadio 中,通过辅助收发机在辅助信道上发送一个低速率、低功率的信号来唤醒对方(信号中包含了对方地址)。STEM^[9] 中也采用了与 PicoRadio 相似的机制,并且辅助收发机也可以通过周期性进入睡眠状态来进一步节省能耗。为了降低辅助收发机的复杂度和功耗,还可以在辅助信道上使用忙音信号(一种窄带的单频载波)来唤醒所有邻居节点。忙音信号不包含编码信息,节点只能在辅助信道上分辨出有无忙音以及忙音的强度,因此通过忙音不能实现唤醒特定节点的功能。Miller^[10] 对基于忙音辅助信号的节能 MAC 协议进行了研究。

3.3 几种有助于提高能耗效率的 MAC 层措施

为了对抗无线信道的不稳定性,在 MAC 层使用 ACK 机

制非常必要,并且有助于提高协议的能耗效率。因为如果让高层协议负责重传(如:TCP 协议),不但时延较长,还会引起许多不必要的重传而降低能耗效率。当前大多数 MAC 协议都使用了 MAC 层确认机制。

在某些高速通信中,可以通过对报文头和报文载荷分别采用不同的速率发送来节能。报文头用较低速率发送,而报文中的载荷用较高速率发送。这样做的好处在于当接收低速率的数据报头时节点不需要将非常耗电的均衡器打开工作(低速率时不需均衡器参与),在节点接收完数据报头后,如果判断自己是目的节点才打开均衡器接收随后的数据载荷,而无关节点则无需将均衡器打开(甚至还可以进入睡眠状态)以节省能耗。欧洲电信标准协会(ETSI)制定的无线局域网标准 HIPERLAN 采用了这种机制。另外,采用不同信道速率发送时,在接收端所需的信噪比也是不同的,发送速率高时接收端所需信噪比也高,因此可以根据发送速率采用功率控制来调节发送功率以节省能耗。当网络负荷较高时,冲突概率增大,这导致了能量的浪费。因此可以根据信道繁忙程度来得到一个发送概率,信道越繁忙,发送概率越小。假如节点决定此次不发送,则如同发生报文冲突一样,进入新的退避过程。节点发送成本较高时采用这种机制比较合适,它在减少冲突的同时也降低了能耗。

4 节能 MAC 协议研究的发展趋势及面临的挑战

4.1 发展趋势

1) 利用定向天线进行节能研究

定向天线通常可以使定向波束在多个扇区之间切换,由于能量只需要在特定方向上传播,所以可用较低的功率发送信号。而某个节点发送时,天线所指方向以外的其他节点都不会收到报文,这也可节省大量能耗并提高网络容量。

2) 利用信道分配技术进行节能研究

信道分配技术利用调度算法在发送时隙和节点之间建立起特定的映射关系,为我们进行节能协议的设计提供了良好的条件。如:可在 TDMA 系统中进行节能 MAC 协议设计,而 Rajendran^[11] 则为传感器网络提出了一种可适应节点流量变化的无碰撞协议,它利用分布式算法决定发送时隙的分配,无关节点可进入睡眠状态以节省能耗。

3) MAC 层与网络层相结合进行节能研究

在动态关闭无线接口设备的研究方面,中继节点可采用不同于普通节点的节能模式,如按需节能协议^[12]、Span 协议等;而在功率控制研究方面,MAC 层与网络层相结合进行混合功率控制可在吞吐率、能耗等方面有更好的性能,如:PARO,COMPOW 协议等。还可以基于分簇结构进行节能研究。

4) 将各种节能机制结合起来进行节能研究

各种节能机制之间并不是相互独立的,可以将它们结合起来以得到性能更好的节能协议。如何将无线接口动态关闭机制、功率控制机制以及其他节能机制有效结合将是一个开放性的课题。

5) 使节能协议向简单化、实用化方向发展

当前已提出的许多节能协议都有假设条件,如功率控制协议中往往假设报文完整交互期间,信道特征保持不变,正、反方向上的衰减相等等;而动态关闭无线接口协议中,往往假设具有全网同步机制。在实际环境中这些假设条件并不一定能完全满足。向简单化、实用化方向发展是节能协议能否得到实际应用的必然要求。

4.2 面临的挑战

1) 与已有协议的兼容

包括两方面的问题:一是与高层协议的兼容,如在多跳网络运行节能 MAC 协议将可能对路由协议的运行产生不利影响;二是与 MAC 层已有协议(如:已得到广泛使用的 802.11 协议)的兼容。能否与已有协议兼容将直接影响到节能 MAC 协议的应用前景。

2) 如何满足 QoS 要求

网络提供 QoS 支持是商业应用的必然要求,而引入某些节能机制(如:动态关闭无线接口机制)后将导致报文发送时延增加、吞吐率下降,这会对一些实时性要求较高的业务产生不利影响。在节能的同时如何满足 QoS 要求是一个必须解决的问题。

5 结语

如何延长移动节点的持续工作时间一直是人们普遍关心的一个问题,在协议栈各层采用节能协议是解决此问题的有效方法。本文从 MAC 层的角度讨论了与节能相关的问题,并提出了一些当前需要继续研究的开放性课题。我们相信,除了在低功耗硬件方面的发展外,MAC 层以及协议栈其它各层节能协议的深入研究将为未来低能耗无线自组网的广泛应用奠定坚实基础,并进一步推动相关产业的发展。

参考文献:

- [1] ANSI/IEEE Std 802.11, IEEE Standard for Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S], 1999.
- [2] MUQATTASH A, KRUNZ M. Power controlled dual channel (PC-DC) medium access protocol for wireless Ad hoc networks [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2003[C]. San Francisco, CA, USA, 2003. 470-480.

- [3] JUNG E-S, VAIDYA NH. A power control MAC protocol for Ad hoc networks [A]. Proceedings of the 8th IEEE/ACM MobiCom Conference [C]. Atlanta, Georgia, USA, 2002. 36-47.
- [4] MUQATTASH A, KRUNZ M. A single-channel solution for transmission power control in wireless Ad hoc networks [A]. Proceedings of ACM MobiHoc'04 [C]. Tokyo, Japan, 2004. 210-221.
- [5] MILLER MJ, VAIDYA NH. Improving Power Save Protocols Using Carrier Sensing and Dynamic Advertisement Windows [R/OL]. <http://www.crhc.uiuc.edu/wireless/groupPubs.html>, 2004-12.
- [6] JUNG E-S, VAIDYA NH. A power saving MAC protocol for wireless networks [R/OL]. <http://www.crhc.uiuc.edu/wireless/groupPubs.html>, 2002-07.
- [7] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE INFOCOM 2002 [C]. NY, USA, 2002, 3. 1567-1576.
- [8] LANGENDOEN K, HALKES G. Embedded Systems Handbook [M]. CRC press, 2005.
- [9] SCHRUGERS C, TSIATIS V, GANERIWAL S, et al. Optimizing sensor networks in the energy-latency-density design space [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002, 1(1): 70-80.
- [10] MILLER MJ, VAIDYA NH. Minimizing energy consumption in sensor networks using a wakeup radio [A]. Proceedings of IEEE WCNC 2004 [C]. Atlanta, GA, USA, 2004, 4. 2335-2340.
- [11] RAJENDRAN V, OBRACZKA K, GARCIA-LUNA-ACEVES JJ. Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks [A]. Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003) [C]. Los Angeles CA, USA, 2003. 181-192.
- [12] ZHENG R, KRAVETS R. On-demand power management for Ad hoc networks [A]. IEEE INFOCOM 2003 [C]. San Francisco, CA, USA, 2003, 1. 481-491.

(上接第 2099 页)

决定。每次仿真的仿真持续时间为 30m,以带宽利用率和丢包率作为比较的性能参数。

在每次仿真中,采集链路利用率和丢包率,运行多次仿真,把每次仿真收集到的数据点连接起来,以丢包率为纵坐标,以链路利用率为横坐标,获得丢包率-网络资源利用率曲线;在处理结点修改接纳控制判别式,可以分别得到用平均速率或峰值速率表示新业务流的申请带宽时的丢包率-网络资源利用率曲线。仿真结果如图 1 所示。从图 1 可知,当网络进行接纳控制时,采用本文的有效带宽比采用峰值速率或平均速率能够获取更好的网络性能。

3 结语

与传统 IP 网络不同,未来 Internet 都被要求为实时应用程序(如多媒体业务)提供一定的 QoS 保证。为此,网络必须借助接纳控制策略对入网的业务负荷加以控制。现有的基于测量的接纳控制算法,通常用新到达的业务流的平均速率或峰值速率来表达该业务流所申请的带宽。但是,平均速率比业务流实际申请的带宽小,会产生较大的丢包率;而峰值速率又比业务流实际申请的带宽大,将会降低网络资源的利用率。TES 过程是一个具有任意边缘分布和很宽范围自相关函数的自相关序列,可以比较理想地模拟网络业务流。本文基于业务流的 TES 模型,求出业务流的有效带宽,并用它来表示新业务流所申请的带宽。本文仿真结果表明,采用有效带宽的基于测量的接纳控制算法可以取得更好的网络性能。这也验证了本文所提出的业务流的有效带宽计算公式的有效性。

参考文献:

- [1] JAMIN S, DANZIG P, SCHENKER S, et al. A measurement-based admission control algorithm for integrated services packet networks [A]. ACM SIGCOMM'95[C], Sept. 1995, 221-226.
- [2] CLARK DD, SHENKER S, ZHANG L. Supporting real-time applications in an integrated services packet network: architecture and mechanism [A]. ACM SIGCOMM'92[C], Aug. 1992, 346-350.
- [3] JAMIN S, DANZIG P, SCHENKER S, et al. An admission control algorithm for predictive real-time service (extended abstract) [A]. Proc. 3rd Int'l Network and Operating Systems Support for Digital Audio and Video Workshop[C], Nov. 1992, 79-83.
- [4] JAGERMAN DL, MELAMED B. The transition and autocorrelation structure of TES processes part I: general theory [J]. Stochastic Models, 1992, 18(2): 193-219.
- [5] JAGERMAN DL, MELAMED B. The transition and autocorrelation structure of TES processes part II: general theory [J]. Stochastic Models, 1992, 18(3): 499-527.
- [6] MELAMENT B, HILL RJ. A survey of TES modeling applications [R]. RUTCOR Research Report RRR 16-95, Rutgers University, New Brunswick, NJ, May 1995: 1-25.
- [7] 桂志波,周立超.突发业务流的 TES 建模方法 [J]. 信号处理, 2003, 12(6): 532-536.
- [8] CHOUDHURY GL, WHITT W. Heavy-traffic asymptotic expansions for the asymptotic decay rates in the BMAP/GI/1 queue [J]. Stochastic Models, 1994, 20(3): 453-498.
- [9] SOHRABY K. On the asymptotic behavior of heterogeneous statistical multiplexer with applications [A]. IEEE INFOCOM'92[C], Nov 1992, 117-122.
- [10] MELAMED B, REN Q, SENGUPTA B. The QTES/PH/1 queue [J]. Performance Evaluation, 1996, 26(1): 1-20.
- [11] GREEN S, WILLIAM H. Econometric analysis [M]. 3rd edition. New York: Macmillan Publishing Company, 1997, 108-110.